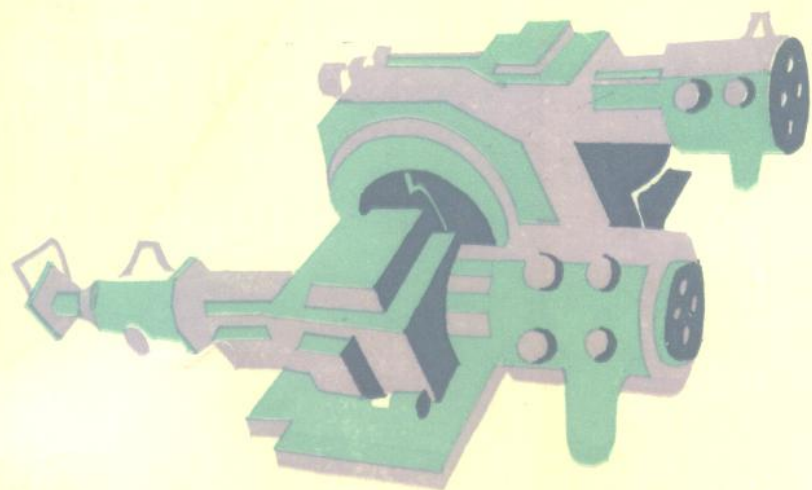


机械设备用油技术丛书



压缩机润滑及其用油

蔡叔华 林振国 编著

中国石化出版社

(京) 新登字048号

内 容 提 要

本书是《机械设备用油技术丛书》中一册。书中主要论述压缩机润滑原理, 润滑方式, 专用润滑油的研制, 性能评定, 以及特殊的润滑问题。内容涉及活塞式压缩机和回转式压缩机两大类, 重点突出这两类压缩机由于其工作结构与润滑方式的差异, 对润滑油使用性能与质量的不同要求, 以及为满足这些要求所进行的试验研究。书中还阐述了压缩机润滑油的正确选择, 压缩机润滑系统的使用、保养与润滑管理。

本书可供从事压缩机设计、制造, 润滑油研制、性能研究与压缩机使用及维护等方面的工程技术人员和大专院校师生参考。

机械设备用油技术丛书
压缩机润滑及其用油
蔡叔华 林振国 编著

中国石化出版社出版
(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码: 100029)
海丰印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 9³/₈印张 208千字 印1—4000
1993年7月北京第1版 1993年7月北京第1次印刷
ISBN 7-80043-281-5/TE·048 定价: 6.00元

前 言

压缩机在现代工业中占有重要地位，并广泛地用于石油化工和其它行业中，但由于润滑不当引起的故障还比较常见，不仅在结构新颖的回转式压缩机上时有发生，即使在传统结构的活塞式压缩机上仍不可避免，不仅影响压缩机效能的发挥，有时还会导致事故。造成这种状态的原因很多，但主要是对不同类型压缩机的润滑特点和对润滑油要求上的差异不甚了解。本书针对这一问题，将从分析压缩机不同工作过程、不同润滑方式与润滑特征着手，系统地论述润滑油在压缩机内的工作条件、氧化老化倾向及其对压缩机工作的影响，并提出适合于这些工况所需的专用润滑油的基本性能与质量要求。同时，对专用润滑油的研制、基础油与添加剂的选择、油品性能的试验评定与合理选用，以及对活塞式压缩机积炭和回转式压缩机的油泡沫等特殊的润滑问题进行了深入探讨。

对于压缩机润滑的研究，已引起国内外的普遍重视，发表的论文也较多，但较有系统的论述却比较少见。本书的编写在国内尚属初次尝试，旨在丰富压缩机润滑理论，促进专用润滑油的试验研究，并对压缩机润滑方面的使用维护予以指导。但由于作者水平有限，书中欠缺和错误在所难免，还望广大读者批评指正。

北京化工学院李斯特教授和中国石化总公司石油化工科学研究院 阎邱 提均高级工程师对本书的编写给予支持和帮助，并提出许多修改意见，谨在此深表感谢。

编著者

目 录

第一章 压缩机润滑的基本任务	1
一、摩擦与磨损	1
二、润滑的基本作用与要求	9
第二章 压缩机类型、结构与发展	13
一、压缩机的应用与分类	13
二、活塞式压缩机	17
三、回转式压缩机	28
四、速度式压缩机	37
第三章 压缩机的润滑系统和润滑方式	44
一、活塞式压缩机的内部润滑	45
二、活塞式压缩机的外部润滑	67
三、回转式压缩机的喷油润滑	83
四、回转式压缩机的油气分离	89
第四章 压缩机润滑油的使用工况和性能要求	98
一、压缩机润滑油的使用工况	98
二、润滑油氧化老化特征及其对压缩机工作的 影响	102
三、对压缩机润滑油使用性能的要求	107
第五章 压缩机润滑油的研制	120
一、矿物油基压缩机油	120
二、合成油基压缩机油	141
第六章 压缩机润滑油的试验评定	168

一、压缩机润滑油的理化性能	168
二、压缩机润滑油使用性能的实验室评定	174
三、压缩机润滑油的台架试验	183
四、压缩机使用油的分析	197
第七章 压缩机润滑油的选择	207
一、压缩机润滑油选择的基本原则	207
二、不同类型压缩机滑用油	211
三、不同介质压缩机滑用油	219
第八章 压缩机润滑系统的使用与保养	225
一、供油量的控制	226
二、使用油老化倾向与换油周期确定	228
三、进气清洁度与进、排气温度控制	233
四、压缩机的防火与防爆	234
五、回转式压缩机的油泡沫问题	246
第九章 压缩机的润滑管理	258
一、压缩机润滑油贮运管理	258
二、压缩机润滑业务管理	261
三、压缩机润滑油的回收再生	262
四、压缩机密封油的回收再生	265
附录	268
一、国内外压缩机润滑油对照表	268
1. 往复式压缩机油	268
2. 回转式压缩机油	272
二、国际标准化组织 (ISO) 压缩机油规格	275
1. 往复式空气压缩机矿物油基润滑油特征 要求	275
2. 回转式空气压缩机矿物油基润滑油特性要求	276

3. 空气压缩机用合成油的建议规格·····	277
三、国外压缩机油规格 ·····	278
1. 美国军用压缩机油规格·····	278
2. 美国船用往复式压缩机润滑油规格·····	278
3. 英国国防部压缩机油规格·····	279
4. 德国压缩机油规格·····	281
5. 日本压缩机油性质·····	282
6. 苏联压缩机油规格·····	283
四、我国压缩机油规格 ·····	286
1. 空气压缩机油国家标准·····	286
2. 回转式空气压缩机油国家标准（轻负荷 喷油内冷）·····	288
参考文献 ·····	290

第一章 压缩机润滑的基本任务

压缩机是一种用于压缩气体、提高其压力的机械，被广泛应用于炼油、石油化工、氮肥生产等工业部门的工艺流程和各行各业的气动设备中。近年来，随着这些工业设备的大型化和向着高载荷、高转速方向发展，对压缩机的种类、性能和可靠性提出了更高的要求。要充分发挥压缩机的效能与安全可靠工作，润滑是重要的环节之一。在这方面，大多数压缩机与其它工业机械的一个明显区别，是润滑油直接接触压缩介质，易受压缩气体性质的影响，容易产生在其它工业机械中所没有的特殊的润滑问题。当今，压缩机又趋向高载荷和高温度操作，这就使机内润滑油的使用条件日趋苛刻。特别是随着压缩机结构的不断更新和润滑方式的相应改变，更加剧了润滑油使用的苛刻程度。这一切均给压缩机的润滑提出了新的课题，需要应用先进的润滑理论，对不同结构和采用不同润滑方式的压缩机润滑特征、润滑油的使用工况作一认真的研究探讨。为了能深入地进行这种研究探讨，首先应从与压缩机运转相关的摩擦、磨损的基本概念，和就压缩机润滑的最基本作用与要求加以分析。

一、摩擦与磨损

压缩机中任何作相互运动的零件接触表面，无论是气缸与活塞环、轴颈与轴承、气阀阀片与阀座、转子槽与滑片表面、相互啮合的两螺杆齿面等等，均会因磨损而逐渐损坏，这

是由于零件间相对运动时产生摩擦和其它作用的结果。按摩擦学的观点，摩擦是将动能转化热能的一种形式。它可以分为内摩擦和外摩擦两种。如果动能转化热能在一个物体内部进行的叫做内摩擦；如果动能转化热能发生在两个物体的接触面上的称为外摩擦。而磨损就是外摩擦时发生的一种现象。

根据摩擦零件表面润滑状态的不同，摩擦可分为如下几种形式：

1) 纯摩擦 这是指两接触表面间完全没有吸附层和各种化合物存在时所发生的摩擦。一般来说，纯摩擦不易出现，只有当接触表面的塑性变形很大时，金属受到破坏而露出纯净表面时才能形成。纯摩擦将带来两接触表面间的严重抓粘并形成熔合。

2) 干摩擦 干摩擦是指摩擦表面之间没有润滑油存在，但覆盖有吸附层和其它物质时所产生的摩擦。在压力为5MPa、相对速度为5m/s以下范围内，干摩擦力的最简单表示式为：

$$F = W \cdot f \quad (1-1)$$

式中 F ——摩擦力；

W ——法向载荷；

f ——摩擦系数。

干摩擦系数 f 与摩擦表面的材料和其所处的状态有关，其值大致如下：

钢与钢 0.15~0.29

铸铁与铸铁 0.15~0.18

钢与铸铁 0.18~0.24

钢与青铜 0.15~0.24

钢与巴氏合金 0.12~0.18

可见，干摩擦系数很大，接触表面的磨损也很强烈。

3) 边界摩擦 当两接触表面之间被一极薄的润滑油膜隔开时，便形成边界摩擦。由于润滑油的油性（一种对金属表面的吸附能力）形成的薄膜具有很大的强度，能承受大的压力，可防止摩擦表面的直接接触。其摩擦系数视金属与润滑油的组合不同而异，其值一般在0.05~0.2范围内。边界摩擦是一种不稳定的润滑状态，在载荷和温度急剧增加时，边界油膜将遭到破裂，随之出现金属间的直接接触，使磨损加剧。

4) 液体摩擦 当两摩擦表面完全被润滑油隔开时称液体摩擦。此时，两固体表面不发生直接接触，摩擦只发生在润滑油内部的油层之间。

根据牛顿定律，液体摩擦力 F 可表达如下：

$$F = \frac{S \mu U}{h} \quad (1-2)$$

式中 S ——摩擦表面积；

μ ——液体动力粘度；

U ——滑动速度；

h ——油膜厚度。

如果将液体摩擦力用类似于干摩擦力的形式来表示，则液体摩擦系数 f' 为：

$$f' = \frac{F}{W} = \frac{S \mu U}{hW} = \frac{\mu U}{h q_{cp}} \quad (1-3)$$

式中 q_{cp} ——摩擦表面在单位投影面上所受到的载荷。

可见，液体摩擦系数 f' 与润滑油动力粘度 μ 、滑动速度 U 成正比，与油膜厚度 h 、单位载荷 q_{cp} 成反比。在良好工作

状态下, 液体摩擦系数可降至0.002~0.004。

5) 半干摩擦 指同时存在边界摩擦和干摩擦的情况。

6) 半液体摩擦 是同时存在液体摩擦和边界摩擦、或同时存在液体摩擦与干摩擦的一种混合情况。

半干摩擦和半液体摩擦统称混合摩擦, 在相接触的金属表面之间, 一部分是液体摩擦, 另一部分则为边界摩擦或干摩擦; 或者, 同一接触表面上, 在某一瞬间呈现为液体摩擦, 而在另一瞬间可能出现边界摩擦甚至干摩擦。可见混合摩擦的差异程度很大, 除了与接触表面粗糙程度、相对移动速度有关外, 尚与载荷性质、润滑油粘度及其变化有关。

图1-1所示为各种摩擦状态下摩擦系数 f 随 $\mu U/W$ 的变化曲线。 $\mu U/W$ 或它的倒数是通常用来表示润滑条件的因素。由图可知, 在点1处 $\mu U/W$ 值较大。随着工作条件向恶劣转移时 (如载荷 W 增加) 由于摩擦力的增加不象载荷增加那么快, 所以摩擦系数缓慢减小, 在过了最小值点2后, 由于一部分变成边界摩擦, 摩擦力开始急剧增加。3~4段为全部边界摩擦, 4~5段为部分干摩擦, 点5以后均为干摩擦。

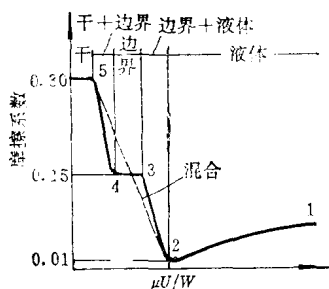


图 1-1 各摩擦状态的摩擦系数

但实际上, 在某种程度的广泛接触面上, 存在着干摩擦、边界摩擦和液体摩擦三种形式的混合状态, 故图中用虚线来表示那种混合状态也许更为确切。

压缩机内各摩擦部件, 除一些采用自润滑的固体润滑剂外, 绝大多数采用液体润滑。尽管如此, 由于压缩机结构类

型、润滑方式的差别，其摩擦状态往往很不一致。即使是同一结构类型的压缩机，机内摩擦机件亦由于所受到的温度、载荷以及润滑条件的不同，其摩擦情况也往往十分复杂。如在传统的活塞式压缩机中，一般只有在曲轴轴颈与主轴承、曲柄销与连杆大端轴承等不变更相对运动方向的旋转摩擦副中，在适当的润滑油粘度和正常工作条件下才能实现液体摩擦；而对于载荷方向作周期性改变、润滑条件又相对较差的活塞与气缸壁、活塞销与销座、活塞销与连杆小端轴承之间，有时则可能处于半液体摩擦状态下工作；其它，如进气阀，由于润滑更为困难，则可能出现边界摩擦或半干摩擦。

机件的摩擦将直接导致磨损。压缩机内机件的磨损可分为摩擦磨损、磨料磨损和腐蚀磨损三种形式。它们既有区别，又密切相关，往往是同时发生的。

1. 摩擦磨损

摩擦磨损是两接触表面直接接触发生摩擦的结果。从理论上说，摩擦磨损只发生在干摩擦、半干摩擦或半液体摩擦的情况。当处于液体摩擦或边界摩擦时，两接触表面被润滑油层或润滑油膜所隔开，不会引起摩擦磨损。但正如前面已指出的，边界摩擦是一种不稳定的润滑状态，液体摩擦也只有在稳定运转时才能建立，在机器停止运转，后又开始起动的某一阶段内，液体摩擦条件即遭破坏或尚未建立。因此，从保护机件表面观点来说，起动时的损害最大。

应该强调的是，压缩机中这种“停止”还周期性地发生在机件的正常工作之中。当作往复运动机件在改变运动方向的瞬间，机件的运动速度为零，此时保持液体摩擦的条件就随之消失。故活塞式压缩机气缸内壁摩擦磨损最明显的部位，就是在活塞改变运动方向的上、下止点处。

摩擦磨损将造成金属摩擦表面的破坏，这种破坏以不光洁面剪切的形态或因熔合而使部分金属由这一表面移植到另

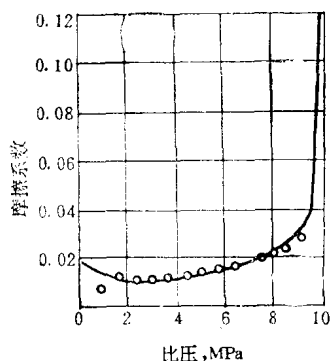


图 1-2 钢对巴氏合金的摩擦

一表面的形态出现。以前一种形态出现时，磨损过程大约类似于锉刀锉平面那样，当两表面受压时，表面上凸起部分互相压入，在产生切向位移时，互相接触的部分就会产生弹性挤压、塑性挤压和部分地被剪掉。其磨损程度与位移成正比，随载荷增加而增加。后一种形态则表现为抓粘。图1-2为钢在巴氏合金中旋转时摩擦

系数增加情况。当比压超过某一数值，抓粘现象一旦产生，摩擦系数就急剧上升。这种情况发生在接触载荷高、润滑条件差、相对速度小的情况下，而且接触表面越干净（无吸附膜和氧化膜），接触面积越大、越紧密，抓粘的可能性亦越大。

2. 磨料磨损

磨料磨损是由落到摩擦表面之间的外界固体微粒对零件发生作用的结果。主要来源是随吸入气体带进摩擦表面的灰尘和润滑油中混入的砂粒。此外，摩擦表面的磨损产物，如金属碎屑、粒末，亦是根源之一。

压缩机中摩擦表面的磨料磨损，主要表现为如下两种形式：

1) 磨料夹在气流或液体流中 如吸入气体中未被过滤干净的灰尘，在随进排气流沿进排气通道时对进排气阀阀片

和阀座的磨损；进入气缸体内的灰砂，在气缸内壁与活塞、活塞环外表面之间随活塞上下运动时所产生的磨损。又如，润滑油中混入的砂粒，随润滑油一起流经气缸内部和运动机件摩擦表面或间隙时所造成的磨损等等，均是流动中固体微粒造成的。

2) 磨料嵌在金属表面 如润滑油中的硬质砂粒或机械摩擦磨损下来的金属屑，嵌入或挤压在硬度较低的轴承合金表面，使那一部分摩擦表面产生塑性变形。

以上两种引起磨料磨损的情况虽然不同，但它们造成的磨损过程则是类似的，这个过程可认为类似于金属切削过程。摩擦表面的磨损量（或塑性变形量）与磨料的种类、数量、几何形状有关，亦与发生磨料磨损时的接触表面的位移和受到的压力有关。

有关的研究表明，磨料磨损与下列因素关系表现为：

(1) 在摩擦条件不变时，磨料磨损的磨损量与压力和摩擦表面的位移成正比；

(2) 在其它条件不变时，磨损量与摩擦表面的滑动速度关系不大，如平均速度增加16倍，未淬火的40号钢磨损量增加13%，淬火的45号钢仅增加约6%；

(3) 磨料硬度和金属接触表面硬度间关系对磨料磨损的影响，情况大体如下：当磨料硬度远大于金属硬度时，两者硬度的变化对磨损影响不大；当磨料硬度稍大于金属硬度时，两者差别越小，磨损越小；如磨料硬度低于金属硬度时，磨损则随两者差距的增加而很快降低；

(4) 进入压缩机中灰砂引起的磨料磨损以石英砂含量的影响最大，磨损和石英砂的含量成正比，磨粒大小对磨损的影响主要视间隙的大小，且受间隙的限制，如磨料尺寸

从 $10\sim 15\mu\text{m}$ 增大为 $20\sim 30\mu\text{m}$ 时，气缸壁的磨损量仅增加 18%。

磨料磨损对压缩机机件的损害不容忽视，特别对于在采矿、建筑、道路等多尘土、多灰砂的野外作业的动力用空气压缩机，在空气过滤器和润滑油滤清器不善的情况下，磨料磨损的损害常会达到惊人的程度。

3. 腐蚀磨损

腐蚀磨损是腐蚀性物质作用于摩擦零件金属表面的结果。压缩机吸入气体中的腐蚀性物质、润滑油中生成的氧化产物以及水分都属于这类物质。当空气压缩机运转停止时，机内生成的冷凝水，使气缸壁等摩擦表面生锈就是腐蚀的最常见形式。对于间断操作或在过冷环境中工作的压缩机，锈蚀现象更为普遍。机件受酸碱的侵蚀和受高温氧化，均属于腐蚀的范围。

金属的腐蚀可分为化学腐蚀和电化学腐蚀两种。

化学腐蚀是金属和外部介质直接发生化学作用的结果，腐蚀介质的存在和高温是促使化学腐蚀加快的主要原因。压缩介质中诸如 SO_2 、 CO_2 等气体与水作用生成的弱酸，润滑油因氧化而生成的各种有机酸，对许多有色金属均有腐蚀作用，特别对含有铅、锌、镉等元素的各种轴承合金（如铅青铜轴承合金）的腐蚀更为严重。高温对腐蚀起了促进作用，承受高温的机件，即使在没有特殊的腐蚀介质存在时，金属亦能与空气中的氧起作用而形成腐蚀。

当化学腐蚀产生电流时，即发生电化学腐蚀，其腐蚀程度较化学腐蚀严重。产生电化学腐蚀的一个条件是存在电解液，水分就是电解液的主要成分，还有其它物质。不同物质对腐蚀速度有很大影响，其影响程度可相差 $10\sim 30$ 倍。如潮

湿空气中硫含量达到0.01%时，腐蚀速度增加15倍。产生电化学腐蚀的另一个条件是存在电位差，有电位差才能形成电流。一般来说，在下列情况下就能形成电位差：

- (1) 不同的金属；
- (2) 表面粗糙度不均匀，粗糙的表面容易腐蚀；
- (3) 金属内应力不均匀，应力大的电位低易受腐蚀，裂缝根部应力集中处，亦较其它部位容易腐蚀。

腐蚀磨损过程表现为两个阶段。第一阶段是腐蚀性物质与金属作用生成不坚固的金属薄膜；第二阶段是这一薄膜被摩擦脱落，以后，金属表面重新受到腐蚀。以轴承的腐蚀为例，开始时由于受到润滑油氧化过程中生成的多种有机酸的作用，合金工作表面形成毛面，进而发展为裂缝和蜂窝。由于合金组成中的一种金属（通常是铅）被腐蚀，在承受压力和摩擦作用下随之发生轴承表面的剥落和破坏。承受的压力越大，破坏也越严重。

二、润滑的基本作用与要求

压缩机润滑的基本任务可归纳为防止摩擦机件的早期磨损和保证压缩机功能需要两个方面。

从防止摩擦机件早期磨损的最基本观点出发，润滑的基本作用与要求是：

- (1) 必须最大限度内使机件在液体摩擦条件下工作和避免金属表面的直接接触。为此，要求润滑油有足够的粘度和形成高强度润滑油膜，而又不引起过大的功率损失。

通过对摩擦零件表面润滑状态的分析，很容易看到，在干摩擦时即在没有润滑油情况下，由于摩擦表面直接接触，在发生相对位移时引起的摩擦磨损和抓粘现象是十分激烈

的，其结果使表面发生擦伤或其它形式的破坏。而当摩擦表面充以一定粘度的润滑油时，就可避免上述损坏。可见，为避免金属间的直接接触，防止摩擦机件早期磨损，建立润滑油层是首要条件。

但实际的零件表面总存在一定的粗糙度，即使其大小是微观的，但它们在表面间足够狭小缝隙中，部分较高的凸起之处还可能相互接触，于是磨损还会存在。因此，在充以润滑油的情况下，在狭小的缝隙中，使润滑油层的厚度超过表面不平度的最大高度是十分重要的。这除了从制造上尽可能使摩擦表面达到高的光洁度外，从润滑上要保证有足够的润滑油量和形成高的润滑油膜强度，以防止在重载荷下润滑油被挤出和油膜破坏。

当两金属表面完全处于液体摩擦状态时，金属间的外摩擦便被润滑油层内的液体摩擦——内摩擦所代替。但应该指出的是，虽然液体摩擦系数比干摩擦系数要低得多，但液体摩擦用于克服内摩擦力所引起的功率损失仍是不可忽视的。在其它条件不变时，内摩擦功率损失将随润滑油粘度增大而增大，这将使压缩机的总功率消耗增加，效率下降。因此，在保证液体摩擦前提下，选择较低粘度的润滑油是有利的。

(2) 必须可靠地保护机件表面不被腐蚀性物质所腐蚀，并不生成对机件材质有害作用的物质，为此要求润滑油具有高的稳定性。

一般此说，附着于机件表面的润滑油膜均具有保护机件表面不受腐蚀的作用，但润滑油中含有的酸、水分、水溶性酸碱，以及因氧化生成的各种氧化产物，这些恰恰是产生机件腐蚀的有害物质。为此，对这些物质的含量必须严格控制，同时要求润滑油须具有高的物理和化学稳定性，在长期

使用条件或贮存下，不致发生分解和产生沉淀物质。但实际上，润滑油在使用中的氧化、老化是不可避免的，压缩机润滑研究的一个重要方面，就是延缓这种氧化、老化的进程和减少由于润滑油氧化、老化引起的对压缩机性能的影响。

(3) 必须有效地从机件间隙中排除金属磨屑和润滑油氧化产物，避免产生磨料磨损，为此要求在机件间隙中的润滑油能经常得到更换。

混在压缩机吸入气体中和混于润滑油中的硬质微粒，金属间相互摩擦磨损下来的碎屑，以及润滑油中生成的氧化产物，如果滞留在机件间隙中，就会成为磨料加剧表面磨损，其中较大的颗粒还会挤入金属表面造成擦伤。因此，机件间隙中的润滑油必须不断循环；及时冲走沉积在摩擦表面上的这些磨料，并充以经过滤清、不含机械杂质的洁净的油。循环的润滑油同时还起到带走机件摩擦热的作用。

从保证压缩机功能需要出发，压缩机的润滑还兼有密封压缩室和吸收气体压缩热的作用。

压缩机为了获得一定的压力和进行有效的工作，对压缩室或工作腔需进行很好的密封。在活塞式压缩机中，压缩室的密封除了诸如活塞环、填料函所组成的接触式密封外，在活塞与气缸壁之间、填料函与活塞杆表面之间形成的润滑油膜，对防止或减少压缩室内高压气体向曲轴箱的泄漏或各压缩级间的泄漏是必不可少的。在滑片式压缩机和螺杆式压缩机中，如转子两端面与气缸端盖之间，螺杆外径与壳体内径，以及两螺杆的齿面之间等相互运动着的零件之间的非接触式密封，更主要是依靠润滑油来实现。

压缩机工作过程中会产生大量的热，除前述的机件摩擦热外，气体在压缩过程中温度的升高是很明显的，如果不对压